

УДК 621.311.24

DOI 10.46960/2658-6754_2023_2_121

ОЦЕНКА ВЕТРОПОТЕНЦИАЛА ДЛЯ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ГОРНОДОБЫВАЮЩИХ ПРЕДПРИЯТИЙ В АЛЬ-ХАЙДЖАНА (СИРИЯ)

Д.А. Устинов

ORCID: 0000-0002-1302-0743 e-mail: ustinov_da@pers.spmi.ru

Санкт-Петербургский горный университет
Санкт-Петербург, Россия

А.Р. Айсар

ORCID: 0000-0003-0999-9634 e-mail: s215010@stud.spmi.ru

Санкт-Петербургский горный университет
Санкт-Петербург, Россия

Приведена оценка потенциала энергии ветра для выработки электроэнергии для горнодобывающих предприятий в Аль-Хайджана – промышленной зоне Адра, расположенной к юго-западу от Дамаска. Горнодобывающая отрасль считается одной из наиболее важных в Сирии. Возобновление полноценной работы данной отрасли в ходе восстановления страны после конфликта является одной из приоритетных задач, поставленных Правительством республики. Область Аль-Хайджана имеет огромный потенциал энергии ветра для выработки электроэнергии, особенно летом, когда порывы ветра характеризуются длительными периодами с достаточной скоростью по сравнению с другими регионами страны. На основе статистических данных определен потенциал энергии ветра, который составил 288,7 кВт/м² на высоте 80 м над уровнем моря. Перспективность местности связана с ее расположением вблизи линии высокого напряжения и наличием обширных бесплодных районов, площадь которых достаточна для ветроэнергетических установок.

Ключевые слова: возобновляемые источники энергии, распределение Рэ-ля, скорость ветра, электрическая мощность, энергия ветра.

Для цитирования: Устинов Д.А., Айсар А.Р. Оценка ветропотенциала для электроснабжения горнодобывающих предприятий в Аль-Хайджана (Сирия) // Интеллектуальная Электротехника. 2023. № 2. С. 121-134.

DOI: 10.46960/2658-6754_2023_2_121

WIND ENERGY POTENTIAL EVALUATION FOR POWER SUPPLY TO MINING ENTERPRISES IN AL HAYJANA, SYRIA

D.A. Ustinov

ORCID: 0000-0002-1302-0743 e-mail: ustinov_da@pers.spmi.ru
Saint-Petersburg Mining University
Saint Petersburg, Russia

A.R. Aysar

ORCID: 0000-0003-0999-9634 e-mail: s215010@stud.spmi.ru
Saint-Petersburg Mining University
Saint Petersburg, Russia

An assessment of the wind power potential for generate electricity for mining operations in Al-Haijana, the industrial zone of Adra, located southwest of Damascus is made. The mining industry is considered one of the most important in Syria. The resumption of the full-fledged work of this industry in the course of the country's reconstruction after the conflict is one of the priority tasks set by the Government of the Republic. The Al Haijan region has a huge wind energy potential to generate electricity, especially in summer when wind gusts are characterized by long periods at a sufficient speed compared to other regions of the country. The wind energy potential, 288.7 kW/m² at a height of 80 m above sea level, was determined based on statistical data. The prospects of the area are associated with its location near the high voltage line and the presence of vast barren areas, the area of which is sufficient for wind turbines.

Keywords: electric capacity, Rayleigh distribution, renewable energies, wind power, wind speed.

For citation: D.A. Ustinov and A.R. Aysar, «Wind energy potential evaluation for power supply to mining enterprises in Al Hayjana, Syria», *Smart Electrical Engineering*, no. 2, pp. 121-134, 2023. DOI: 10.46960/2658-6754_2023_2_121

I. Введение

С каждым годом запасы ископаемых природных ресурсов уменьшаются, а спрос на электроэнергию стремительно растет. Это повышает значение альтернативных источников энергии, использование которых становится актуальным на энергетическом рынке [1]. Одними из наиболее популярных и стабильных возобновляемых источников на данный момент являются использование энергии ветра для производства электричества. Темпы развития ветроэнергетики позволяют уже сейчас использовать ее для электроснабжения практически всех потребителей: от промышленных предприятий до городского населения [2]. На глобальном уровне растущий спрос на

электроэнергию вызвал значительный рост мощностей по ее производству. Кроме того, поскольку электростанции, как правило, расположены далеко от центров электрических нагрузок, возможны большие потери электроэнергии и сложность в обеспечении требуемого уровня напряжения. Решению этих проблем может способствовать установка объектов распределенной генерации вблизи центров нагрузок [3].

Ветер является идеальным источником энергии: он неисчерпаем и не оставляет вредных загрязнителей. В 2021 г. суммарная мощность ветроэнергетических установок (ВЭУ) в мире была увеличена на 94 ГВт. Данное значение ниже соответствующего показателя за 2020 г. на 1,8 % [4]. В первую очередь, снижение было вызвано замедлением роста производства объектов наземной ветроэнергетики на двух крупнейших рынках: в Китае и США. В прошлом году было введено в эксплуатацию 21,1 ГВт оффшорной ветроэнергетики, что в 3 раза больше, чем в 2020 г. Таким образом, 2021 г. стал лучшим годом в истории оффшорной ветроэнергетики, а его доля на мировом рынке составила 22,5 %. На долю Китая приходится 80 % оффшорной ветроэнергетики [5]. Общая установленная мощность ВЭУ в настоящее время достигает 837 ГВт, что обеспечивает сокращение выбросов CO₂ ежегодно на 1,2 млрд тонн.

Дефицит энергетических ресурсов является одной из главных технических проблем, связанных с развитием горнопромышленного сектора республики Сирия. Поэтому целесообразна оценка потенциала энергии ветра для выработки электроэнергии для электроснабжения горнодобывающих предприятий [6].

II. Выбор участка для реализации проекта

Сирия расположена между широтами 32,3° и 37° к северу от экватора и между меридианами 36° и 42,5° к востоку от Гринвичского меридиана. Площадь сирийского региона составляет 185 517 км [7]. На основании карты ветров Сирии собраны статистические данные о скорости ветра в нескольких географических округах страны с различным ландшафтом: вблизи побережья, высокогорья, в зоне лесов и городских округов. Рассмотрены следующие участки с относительно большой территорией и перспективой для создания ветроэлектростанций: Аль-Хайджана, Металхиджана, Тадмур, Хомс, Синдиана и Габагхаб. На сегодняшний день нет никаких сведений о ветряных электростанциях в Сирии [8].

До начала конфликта сирийское правительство планировало развитие возобновляемых источников энергии в стране [9]. Область Аль-Хайджана является одним из самых перспективных объектов для ветроэнергетики в Сирии. Средние скорости ветра составляют 5,0 м/с на высоте 10 м и 6,70 м/с на высоте 40 м. Район Аль-Хайджана, один из районов Сирии с высокой ветровой интенсивностью, расположен в пределах первого района,

подготовленного для создания ветряных электростанций и недалеко от высоковольтных линий для подключения к энергосистеме [10].



Рис. 1. Расположение объекта Аль-Хиджана в Сирии
(33°21'31''N, 36°32'39''E)

Fig. 1. Location of the Al-Hijana site in Syria
(33°21'31''N, 36°32'39''E)

III. Выбор структуры и параметров ВЭУ

Применительно к электрической мощности, необходимой для электроснабжения горнодобывающего сектора в изучаемом промышленном городе, было установлено, что потребность составляет 100 МВт [11]. После анализа существующих типов ВЭУ были выбраны установки V90 мощностью 3 МВт из Вестаса, в количестве 34 штук. Таким образом, суммарная мощность ВЭУ составит $3 \times 34 = 102$ МВт, и это число близко к требуемой [12]. Зависимость генерируемой мощности одной ВЭУ от скорости ветра показана на рис. 2.



Рис. 2. Зависимость мощности турбины V90 3,0 МВт от скорости ветра

Fig. 2. V90-3.0 MW turbine power curve

При проектировании ветроустановки необходимо учитывать скорость и направление ветра в течение года. Анализ собранных статистических данных ветряного потенциала показал, что наибольшим потенциалом в течение года обладает юго-западный ветер [13].

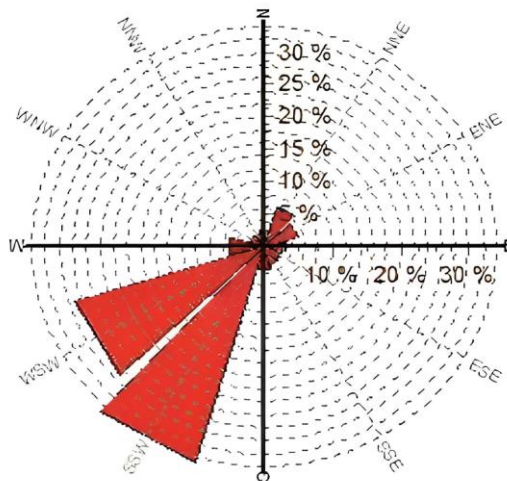


Рис. 3. Преобладающее направление ветра на высоте 40 м в районе Аль-Хиджана [14]

Fig. 3. Prevailing wind direction at a height of 40 m in the Al-Hijana area [14]

План расположения 34 ВЭУ показан на рис. 4.

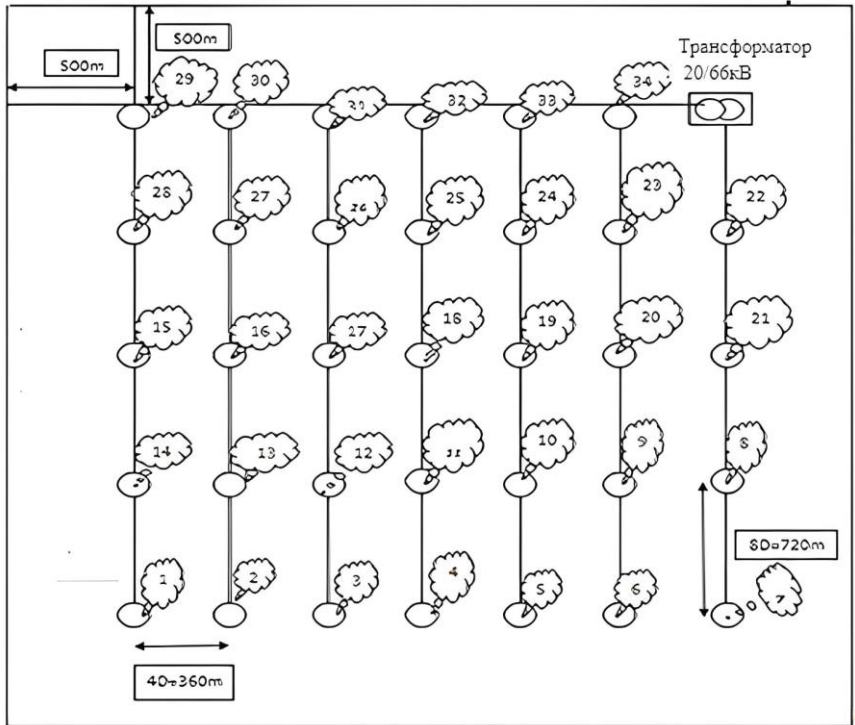


Рис. 4. Схема расположения пронумерованных турбин и соединения с электрической подстанцией

Fig. 4. Layout of numbered turbines and connection to the electrical substation

Всего предполагается 7 рядов ВЭУ: в шести рядах по пять установок, в одном ряду – четыре. В этом же ряду в качестве замыкающей установки находится трансформатор 20/66 кВ [15]. Технические параметры трансформаторной подстанции 20/66 кВ для подключения ветряной электростанции к сети будут определены Сирийской корпорацией по передаче электроэнергии в соответствии с утвержденными методиками выбора и проверки электрооборудования [16].

Расстояние между рядами составляет $4 \cdot d = 4 \cdot 90 = 360$ м, где d – это диаметр ветровой турбины [17]. Расстояние между установками в одном ряду составляет $8 \cdot d = 8 \cdot 90 = 720$ м.

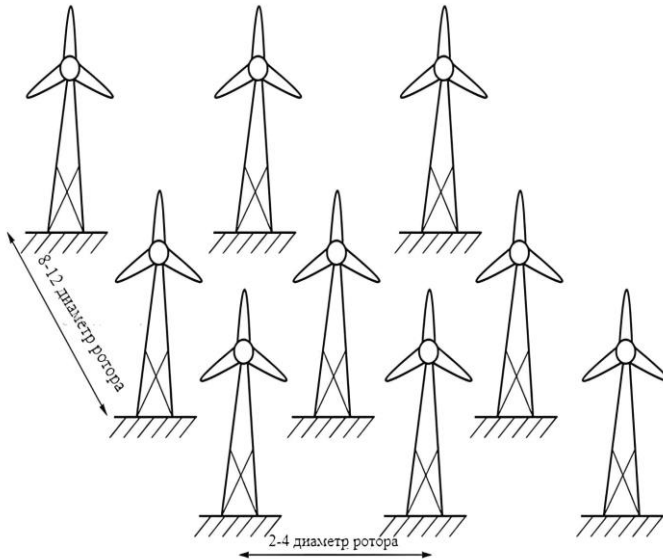


Рис. 5. Боковое и продольное расстояния между ветряными турбинами [18]

Fig. 5. Lateral and longitudinal distances between wind turbines [18]

Расстояние между первым и крайним рядами составляет $360 \cdot 6 = 2160$ м. Расстояние между первой и крайней ВЭУ в одном ряду составляет $720 \cdot 4 = 2880$ м. Следовательно, площадь земли, занимаемой всеми ВЭУ, составляет $2160 \cdot 2880 = 6,2208$ км². Для более эффективной работы нужно учесть запас площади по 500 м с каждой стороны. Тогда необходимая площадь земли для сооружения ВЭУ составит:

$$(2160 + 1000) \cdot (2880 + 1000) = 12,2608 \text{ км}^2.$$

Именно такая область доступна в районе Аль-Хайджана.

IV. Выбор кабелей

Определим выходной ток каждой турбины:

$$I = \frac{P}{\sqrt{3} \cdot U \cdot \cos \varphi} = \frac{3000000}{\sqrt{3} \cdot 20000 \cdot 0,96} = 90,211 \text{ А.} \quad (1)$$

Кабели проложим с заглублением в почву для лучшего рассеивания тепла. Согласно полученному значению тока, выберем достаточное сечение кабеля: 25 мм² [19]. Зная ток одной ВЭУ, определим токи на всех участках и произведем выбор кабелей необходимых сечений. Результаты занесем в табл. 1. Считая ток одной турбины равным 90,211 А, определяем необходимые сечения кабелей к трансформаторам с минимальными затратами [20].

Таблица 1.
Результат выбора кабелей

Table 1.
Result of cable selection

Кабель	Ток, А	Сечение, мм ²	Необходимая длина кабеля, м	Общая длина кабеля, м
От вершины турбины до земли	90,211	3x25	105	105·34=3570
От первой ко второй ВЭУ в ряду	90,211x1	3x25	720	720·7=5040
От второй к третьей ВЭУ в ряду	90,211x2	3x70	720	720·7=5040
От третьей к четвертой ВЭУ в ряду	90,211x3	3x150	720	720·7=5040
От четвертой к пятой ВЭУ в ряду	90,211x4	3x240	720	720·7=5040
От турбины 29 до тр-ра	90,211x5	3x300	360x6	2160
От турбины 30 до тр-ра	90,211x5	3x300	360x5	1800
От турбины 31 до тр-ра	90,211x5	3x300	360x4	1440
От турбины 32 до тр-ра	90,211x5	3x300	360x3	1080
От турбины 33 до тр-ра	90,211x5	3x300	360x2	720
От турбины 34 до тр-ра	90,211x5	3x300	360x1	360

V. Мощность, производимая ветряной электростанцией

Для ветровой электростанции с ветроустановкой номинальной мощностью 3 МВт при номинальной скорости ветра 15 м/с, минимальной скорости ветра 4 м/с, максимальной скорости ветра 25 м/с, рассчитаем среднюю скорость ветра в районе Аль-Хиджана при высоте установки турбины 105 м. По имеющимся статистическим данным о скорости ветра на высотах 10 м и 40 м определим среднюю скорость ветра на высоте установки турбины, 105 м [21]:

$$v_{105} = v_{40} \cdot \left(\frac{105}{40} \right)^{\alpha} = 7,1769 \text{ м/с}, \quad (2)$$

где α – коэффициент поверхностного трения, для данной области $\alpha = 0,157985$.

Используя распределение Рэля, определим значение вероятности скорости ветра [23]:

$$n_i = 8760 \cdot \frac{\pi}{2} \cdot \frac{v_i}{v^2} \cdot e^{-k}, \quad (3)$$

где i – количество часов, в течение которых ветер дует со скоростью v ; v – средняя скорость ветра на желаемой высоте; $k = \frac{\pi}{4} \cdot \left(\frac{v_i}{v}\right)^2$. Получаем график рэлеевского распределения для остальных скоростей ветра [24].

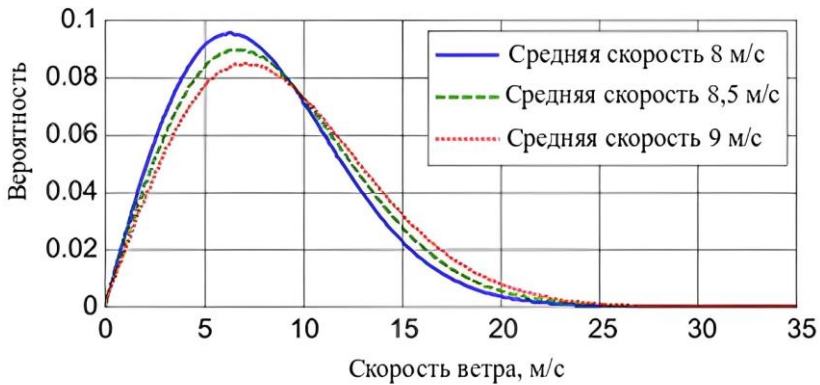


Рис. 6. Диаграмма распределения скорости ветра по Рэлю в районе Аль-Хайгана [25]

Fig. 6. Rayleigh wind speed distribution diagram in the Al-Hijana area [25]

Используя распределение Рэля, определим возможное вырабатываемое значение энергии при значениях скорости ветра от 4 до 25 м/с. Результаты расчета приведены в табл. 2 [26].

Вычислив мощность, вырабатываемую на всех скоростях, на которых работают турбины, от скорости 4 м/с до скорости 25 м/с, а затем определив мощность, вырабатываемую в течение года, мы получим годовую энергию, произведенную этой ветряной электростанцией.

Общая энергия составит 5196162,17 кВт·ч/г = 5,2 ГВт·ч/г.

Таблица 2.
Расчет количества ветрочасов в течение года и общей выработанной энергии

Table 2.
**Calculation of the number of wind hours during the year
and the total generated energy**

$v, \text{ м/с}$	k	$n_i, \text{ ч}$	$E_i \cdot 0,95, \text{ кВт}\cdot\text{ч/г}$	$E_i, \text{ кВт}\cdot\text{ч/г}$
4	0,244	837,2506	45249	47630
5	0,3812	912,3593	96305	101370
6	0,5489	925,7704	168860	177750
7	0,7472	885,8534	256580	270090
8	0,9759	805,4178	348230	366550
9	1,2351	699,1926	430420	453080
10	1,5248	581,4777	491030	516870
11	1,845	464,3657	521930	549400
12	2,1957	356,7293	520540	547940
13	2,5769	263,9652	489720	515490
14	2,9886	188,3357	436400	459370
15	3,4308	129,674	369570	389020
16	3,9035	86,2173	298210	313910
17	4,4067	55,3849	229780	241870
18	4,9404	34,3906	169370	178280
19	5,5046	20,649	119600	125890
20	6,0992	11,9926	81016	85280
21	6,7244	6,7389	52701	55475
22	7,3801	3,6647	32952	34686
23	8,0663	1,9291	19820	20863
24	8,7829	0,9831	11476	12080
25	9,5301	0,4851	6400	6737,5

VI. Заключение

Оценка ветропотенциала в районе Аль-Хайджана и определение электрической мощности, которая может быть получена от ветряной электростанции, позволяют заключить, что она способна обеспечить достаточный объем электроэнергии в промышленном городе Адра недалеко от Дамаска, решив проблему перебоев с подачей электроэнергии.

© Устинов Д.А., 2023

© Аисар А.Р., 2023

Поступила в редакцию 03.02.2023

Принята к публикации 06.04.2023

Received 03.02.2023

Accepted 06.04.2023

Библиографический список

- [1] Lavrik A., Zhukovskiy Y., Tsvetkov P. Optimizing the size of autonomous hybrid microgrids with regard to load shifting // *Energies*. 2021. № 14 (16). P. 1-18. DOI: 10.3390/en14165059
- [2] Hosseinalizadeh R., Shakouri G.H., Amalnick M.S., Taghipour P. Economic sizing of a hybrid (PV-WT-FC) renewable energy system (HRES) for stand-alone usages by an optimization-simulation model: Case study of Iran // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2016. Vol. 54. P. 139-150. DOI: 10.1016/j.rser.2015.09.046
- [3] Sychev Yu.A., Abramovich B.N., Zimin R.Yu., Kuznetsov R.A. Mathematical modeling of harmonic correction by parallel active filter in conditions of distributed generation // *Journal of Physics: Conference Series*. 2019. Vol. 1333. No. 3. DOI: 10.1088/1742-6596/1333/3/032081
- [4] IEA. Total Installed Power Capacity by Fuel and Technology 2019-2025, main case. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/total-installed-power-capacity-by-fuel-and-technology-2019-2025-main-case> (дата обращения 06.06.2021).
- [5] Бельский А.А., Добуш В.С., Хайкал Ш.Ф. Эксплуатация однофазного автономного инвертора в составе ветроэнергетического комплекса малой мощности // *Записки Горного института*. 2019. Т. 239. С. 564-569. DOI: 10.31897/PMI.2019.5.564
- [6] Dobush V.S., Belsky A.A., Skamyin A.N. Electrical complex for autonomous power supply of oil leakage detection systems in pipelines // *Journal of Physics Conference Series*. 2020. № 1441. 012021. DOI: 10.1088/1742-6596/1441/1/012021
- [7] Abramovich B.N., Ustinov D.A., Abdallah W.J. Development and design of a mobile power plant in the form of a standalone power supply // *Journal of Physics Conference Series*. 2021. № 1753. 012006. DOI: 10.1088/1742-6596/1753/1/012006
- [8] Lukutin B.V., Muravyev D.I., Ryzhkova A.V. The efficiency of combined electrothermal and electrochemical accumulation of electricity of a photovoltaic power plant // *IOP Conference Series Materials Science and Engineering*. 2021. № 1019. 012053. DOI: 10.1088/1757-899X/1019/1/012053
- [9] Chauhan A., Saini R.P. Size optimization and demand response of a stand-alone integrated renewable energy system // *Energy*. 2017. Vol. 124. P. 59-73. DOI: 10.1016/j.energy.2017.02.049
- [10] Sychev Y.A., Aladin M.E., Serikov V.A. Developing a hybrid filter structure and a control algorithm for hybrid power supply // *International Journal of Power Electronics and Drive Systems*. 2022. № 13 (3). P. 1625-1634. DOI: 10.11591/ijpeds.v13.i3.pp1625-1634
- [11] Воронин В.А., Непша Ф.С. Имитационное моделирование электропривода очистного комбайна для оценки показателей энергоэффективности системы электроснабжения // *Записки Горного института*. 2020. Т. 246. С. 633-639. DOI: 10.31897/PMI.2020.6.5
- [12] Skamyin A., Belsky A., Dobush V., Gurevich I. Computation of nonlinear load harmonic currents in the presence of external distortions // *Computation*. 2022. № 10 (3). 41. DOI: 10.3390/computation10030041

- [13] R.E. Commission. Request for Qualification (RFQ). Syrian Ministry of Electricity. 2009.
- [14] Justus C., Mikhail A. Height variation of wind speed and wind distributions statistics // Geophysical Research Letters. 1976. № 3 (5). P. 261-264. DOI: 10.1029/GL003I005P00261
- [15] Justus C., Hargraves W., Mikhail A., Graber D. Methods for estimating wind speed frequency distributions // Journal of Applied Meteorology. 1978. № 17 (3). P. 350-353. DOI: 10.1175/1520-0450(1978)017<0350:MFEWSF>2.0.CO;2
- [16] Pimenta F., Kempton W., Garvine R. Combining meteorological stations and satellite data to evaluate the offshore wind power resource of Southeastern Brazil // Renewable Energy. 2008. № 33 (11). P. 2375-2387. DOI: 10.1016/j.renene.2008.01.012
- [17] Teetz H., Harms T., Willem von Backström T. Assessment of the wind power potential at SANAE IV base, Antarctica: a technical and economic feasibility study // Renewable Energy. 2003. № 28 (13). P. 2037-2061. DOI: 10.1016/S0960-1481(03)00076-4
- [18] Rehman S., Al-Abbadi N.M. Wind shear coefficients and energy yield for Dhahran, Saudi Arabia // Renewable Energy. 2007. № 32 (5). P. 738-749. DOI: 10.1016/j.renene.2006.03.014
- [19] Khogali A., Albar O., Yousif B. Wind and solar energy potential in Makkah (Saudi Arabia) comparison with Red Sea coastal sites // Renewable Energy. 1991. № 1 (3). P. 435-440. DOI: 10.1016/0960-1481(91)90054-S
- [20] Ahmed Shata A., Hanitsch R. Applications of electricity generation on the western coast of the Mediterranean Sea in Egypt // International Journal of Ambient Energy. 2008. № 29 (1). P. 35-44. DOI: 10.1080/01430750.2008.9675054
- [21] Amar F.B., Elamouri M., Dhifaoui R. Energy assessment of the first wind farm section of Sidi Daoud, Tunisia // Renewable Energy. 2008. № 33 (10). P. 2311-2321. DOI: 10.1016/j.renene.2007.12.019
- [22] Chang T.-J., Wu Y.-T., Hsu H., Chu C., Liao C.-M., Assessment of wind characteristics and wind turbine characteristics in Taiwan // Renewable Energy. 2003. № 28 (6). P. 851-871. DOI:10.1016/S0960-1481(02)00184-2
- [23] Habali S., Hamdan M., Jubran B., Zaid A.I. Assessment and applications of wind energy in Jordan // Solar Energy. 1988. № 40 (2). P. 99-105.
- [24] Gupta B. Weibull parameters for annual and monthly wind speed distributions for five locations in India // Solar Energy. 1986. № 37 (6). P. 469-471.
- [25] Patel M.R. Wind and Solar Power Systems: Design, Analysis, and Operation. 2nd ed. Boca Raton: CRC Press, 2005. – 472 p. DOI: 10.1201/9781420039924
- [26] Hrayshat E.S. Wind resource assessment of the Jordanian southern region // Renewable Energy. 2007. № 32 (11). P. 1948-1960. DOI: 10.1016/j.renene.2006.11.008

References

- [1] A. Lavrik, Yu. Zhukovskiy and P. Tsvetkov, “Optimizing the size of autonomous hybrid microgrids with regard to load shifting”, *Energies*, vol. 14, no. 16, pp. 1-18, 2021. DOI: 10.3390/en14165059
- [2] R. Hosseinalizadeh, G.H. Shakouri, M.S. Amalnick and P. Taghipour, “Economic sizing of a hybrid (PV-WT-FC) renewable energy system (HRES) for stand-alone usages by an optimization-simulation model: Case study of Iran”, *Renewable and*

- Sustainable Energy Reviews*, vol. 54, pp. 139-150, Feb. 2016. DOI: 10.1016/j.rser.2015.09.046
- [3] Yu.A. Sychev, B.N. Abramovich, R.Yu. Zimin and R.A. Kuznetsov, “Mathematical modeling of harmonic correction by parallel active filter in conditions of distributed generation”, *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 1333, no. 3, Oct. 2019. DOI: 10.1088/1742-6596/1333/3/032081
- [4] IEA. Total Installed Power Capacity by Fuel and Technology 2019-2025, main case. [Online]. Available at: <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/total-installed-power-capacity-by-fuel-and-technology-2019-2025-main-case> [Accessed: Jun. 6, 2021].
- [5] A.A. Belsky, V.S. Dobush and S.F. Haikal, “Operation of a single-phase autonomous inverter as a part of a low-power wind complex”, *Journal of Mining Institute*, vol. 239, pp. 564-569, 2019. DOI: 10.31897/PMI.2019.5.564
- [6] V.S. Dobush, A.A. Belsky and A.N. Skamyin, “Electrical complex for autonomous power supply of oil leakage detection systems in pipelines”, *Journal of Physics Conference Series*, vol. 1441, 012021, Jan. 2020. DOI: 10.1088/1742-6596/1441/1/012021
- [7] B.N. Abramovich, D.A. Ustinov and W.J. Abdallah, “Development and design of a mobile power plant in the form of a standalone power supply”, *Journal of Physics Conference Series*, vol. 1753, 012006, Feb. 2021. DOI: 10.1088/1742-6596/1753/1/012006
- [8] B.V. Lukutin, D.I. Muravyev and A.V. Ryzhkova, “The efficiency of combined electrothermal and electrochemical accumulation of electricity of a photovoltaic power plant”, *IOP Conference Series Materials Science and Engineering*, vol. 1019, 012053, Jan. 2021. DOI: 10.1088/1757-899X/1019/1/012053
- [9] A. Chauhan and R.P. Saini, “Size optimization and demand response of a stand-alone integrated renewable energy system”, *Energy*, vol. 124, pp. 59-73, Feb. 2017. DOI: 10.1016/j.energy.2017.02.049
- [10] Y.A. Sychev, M.E. Aladin and V.A. Serikov, “Developing a hybrid filter structure and a control algorithm for hybrid power supply”, *International Journal of Power Electronics and Drive Systems*, vol. 13, no. 3, pp. 1625-1634, Sep. 2022. DOI: 10.11591/ijpeds.v13.i3.pp1625-1634
- [11] V.A. Voronin and F.S. Nepsha, “Simulation of the electric drive of the shearer to assess the energy efficiency indicators of the power supply system”, *Journal of Mining Institute*, vol. 246, pp. 633-639, Dec. 2020. DOI: 10.31897/PMI.2020.6.5
- [12] A. Skamyin, A. Belsky, V. Dobush and I. Gurevich, “Computation of nonlinear load harmonic currents in the presence of external distortions”, *Computation*, vol. 10, no. 3, 41, Mar. 2022. DOI: 10.3390/computation10030041
- [13] R.E. Commission. Request for Qualification (RFQ). Syrian Ministry of Electricity. 2009.
- [14] C. Justus and A. Mikhail, “Height variation of wind speed and wind distributions statistics”, *Geophysical Research Letters*, vol. 3, no. 5, pp. 261-264, May 1976. DOI: 10.1029/GL003I005P00261
- [15] C. Justus, W. Hargraves, A. Mikhail and D. Graber, “Methods for estimating wind speed frequency distributions”, *Journal of Applied Meteorology*, vol. 17, no. 3, pp. 350-353, Mar. 1978.

- DOI: 10.1175/1520-0450(1978)017<0350:MFEWSF>2.0.CO;2
- [16] F. Pimenta, W. Kempton and R. Garvine, "Combining meteorological stations and satellite data to evaluate the offshore wind power resource of Southeastern Brazil", *Renewable Energy*, vol. 33, no. 11, pp. 2375-2387, Nov. 2008. DOI: 10.1016/j.renene.2008.01.012
- [17] H. Teetz, T. Harms, T. Willem von Backström, "Assessment of the wind power potential at SANAE IV base, Antarctica: a technical and economic feasibility study", *Renewable Energy*, vol. 28, no. 13, pp 2037-2061, Oct. 2003. DOI: 10.1016/S0960-1481(03)00076-4
- [18] S. Rehman, N. M. Al-Abadi, "Wind shear coefficients and energy yield for Dhahran, Saudi Arabia", *Renewable Energy*, vol. 32, no. 5, pp 738-749, Apr. 2007. DOI: 10.1016/j.renene.2006.03.014
- [19] A. Khogali, O. Albar, B. Yousif, "Wind and solar energy potential in Makkah (Saudi Arabia) comparison with Red Sea coastal sites", *Renewable Energy*, vol. 1, no. 3, pp. 435-440, 1991. DOI: 10.1016/0960-1481(91)90054-S
- [20] A. Ahmed Shata and R. Hanitsch, "Applications of electricity generation on the western coast of the Mediterranean Sea in Egypt", *International Journal of Ambient Energy*, vol. 29, no. 1, pp. 35-44, Jan. 2008. DOI: 10.1080/01430750.2008.9675054
- [21] F.B. Amar, M. Elamouri and R. Dhifaoui, "Energy assessment of the first wind farm section of Sidi Daoud, Tunisia", *Renewable Energy*, vol. 33, no. 10, pp. 2311-2321, Feb. 2008. DOI: 10.1016/j.renene.2007.12.019
- [22] T.-J. Chang, Y.-T. Wu, H. Hsu, C. Chu, C.-M. Liao, "Assessment of wind characteristics and wind turbine characteristics in Taiwan", *Renewable Energy*, vol. 28, no. 6, pp. 851-871, May 2003. DOI: 10.1016/S0960-1481(02)00184-2
- [23] S. Habali, M. Hamdan, B. Jubran and A.I. Zaid, "Assessment and applications of wind energy in Jordan", *Solar Energy*, vol. 40, no. 2, pp. 99-105, 1988.
- [24] B. Gupta, "Weibull parameters for annual and monthly wind speed distributions for five locations in India", *Solar Energy*, vol. 37, no. 6, pp. 469-471, 1986.
- [25] M.R. Patel, *Wind and Solar Power Systems: Design, Analysis, and Operation*. 2nd ed. Boca Raton: CRC Press, 2005. DOI: 10.1201/9781420039924
- [26] E.S. Hrayshat, "Wind resource assessment of the Jordanian southern region", *Renewable Energy*, vol. 32, no. 11, pp. 1948-1960, Sep. 2007. DOI: 10.1016/j.renene.2006.11.008

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Устинов Денис Анатольевич, кандидат технических наук, доцент Санкт-Петербургского горного университета, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация

Denis A. Ustinov, Cand. Sci. (Eng.), associate professor of the Saint-Petersburg Mining University, Saint Petersburg, Russian Federation

Айсар Абу Рашид, аспирант Санкт-Петербургского горного университета, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация

Abu Rashid Aysar, postgraduate student of the Saint-Petersburg Mining University, Saint Petersburg, Russian Federation